Laboratório de Estrutura da Matéria I

Interferência e difração com microondas

PRINCÍPIO E OBJETIVOS

Fenômenos óticos de interferência e difração são investigados com uso de feixes de microondas e objetos com dimensões macroscópicas atuando como refletores parciais e totais e como redes cristalinas.

TÓPICOS RELACIONADOS

Geração e detecção de microondas, cavidades de ressonância, interferômetro de Fabry-Perot, interferômetro de Michelson, difração, lei de Bragg.

EQUIPAMENTO

Transmissor e receptor de microondas, goniômetro, refletores parciais e totais (metálicos), plataforma fixa e giratória, rede cúbica com esferas metálicas.

TAREFAS EXPERIMENTAIS

1. Investigar a variação da intensidade de um feixe de microondas em função da distância e verificar o estado de polarização do feixe.
2. Estudar o interferômetro de Faby-Perot utilizando feixe de microondas e determinar o comprimento de onda do feixe.
3. Estudar o interferômetro de Michelson utilizando feixe de microondas e determinar o comprimento de onda do feixe.
4. Estudar a difração de Bragg utilizando microondas e uma rede cúbica de dimensões macroscópicas, determinando a distância interplanar.

PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

AULA 01:

Familiarização com o equipamento:

1. Com o arranjo experimental esquematizado na Fig. 1, é possível o estudo das principais características do sistema no que diz respeito à transmissão e detecção de microondas.
2. O transmissor consiste em um diodo Gunn dentro de uma cavidade ressonante de 10,525 GHz (comprimento de onda de 2,85 cm), dando origem a uma radiação coerente com 15 mW de potência, linearmente polarizada ao longo do eixo do diodo. A corneta de saída do transmissor irradia um intenso feixe de microondas centrado ao longo do seu eixo de simetria (Fig. 1a).

3. Uma corneta idêntica é ligada ao receptor de microondas (Fig. 1a), o qual consiste em um diodo Schottky em uma cavidade ressonante de 10,525 GHz. Este diodo responde somente à radiação que é polarizada linearmente ao longo do seu eixo, dando origem a uma tensão DC que varia em magnitude de acordo com a intensidade da radiação de microondas. A leitura no medidor acoplado ao receptor fornece um valor que, para sinais de baixa amplitude, é aproximadamente proporcional a essa intensidade. (É importante observar que em geral essa leitura não é exatamente proporcional nem à intensidade da onda e nem à amplitude do campo elétrico, devido às características não-lineares dos diodos do transmissor e do receptor. Isso não traz nenhum inconveniente já que todas as medidas são feitas de forma comparativa e não absoluta.) A tensão DC pode alternativamente ser lida diretamente com um voltímetro conectado aos terminais disponíveis no receptor.

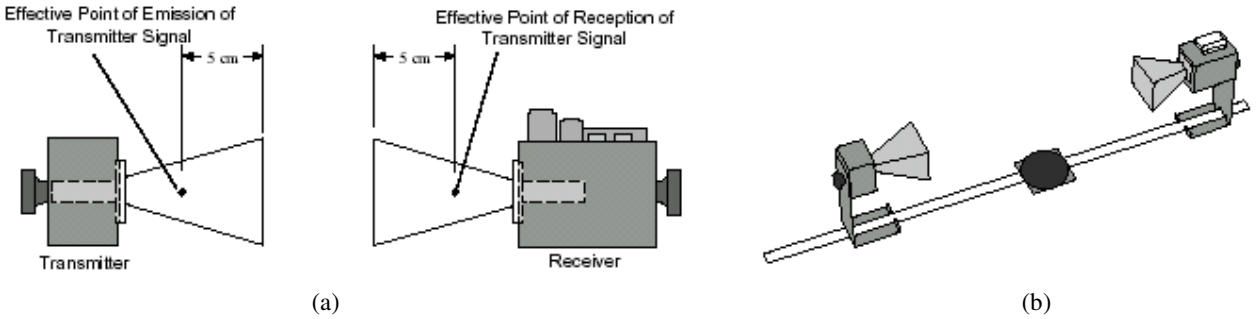


Fig. 1: (a) Transmissor e receptor de microondas, com as respectivas cornetas. (b) Arranjo experimental para os testes iniciais.

4. O receptor possui um seletor de ganho ("INTENSITY") com quatro opções (1×, 3×, 10× e 30×). Esses valores indicam o fator pelo qual a leitura do medidor deve ser multiplicada para normalizar as medidas efetuadas em diferentes escalas, contanto que o controle contínuo de sensibilidade ("VARIABLE SENSITIVITY") não seja alterado de uma escala para outra.
5. Posicione a corneta receptora orientada paralelamente à corneta transmissora, verificando os ângulos correspondentes que medem a orientação relativa das duas cornetas (veja a Fig. 1b). Ajuste a sensibilidade para que o medidor forneça uma leitura aproximadamente na metade da escala. Se necessário, mude o ganho do receptor.
6. Verifique como varia a intensidade da radiação detectada em função da distância entre o transmissor e o receptor. Para isso, meça a intensidade detectada mantendo o transmissor fixo e variando a posição do receptor a cada 2 ou 3 cm.
7. Meça agora como varia a intensidade da radiação detectada em função do ângulo entre as cornetas de transmissão e recepção, investigando assim o estado de polarização do feixe de microondas utilizado. Mantenha umas das cornetas fixas e gire a outra, registrando a intensidade a cada ângulo de giro de 10°.

Interferômetro de Fabry-Perot:

8. O arranjo experimental encontra-se esquematizado na Fig. 2. Duas placas parcialmente refletoras (não-metálicas) são posicionadas paralelamente entre o transmissor e o receptor, gerando feixes que interferem construtiva ou destrutivamente ao chegarem ao receptor. Conecte o transmissor à fonte de alimentação e ajuste os controles do receptor de modo que um sinal com intensidade razoável seja observável no medidor.
9. Ajuste a distância entre os refletores parciais e observe os máximos e mínimos de intensidade registrados. Para obter resultados confiáveis, não altere a posição do refletor mais próximo do transmissor, já que também há ondas estacionárias nessa região com intensidade apreciável.
10. Anote a posição do primeiro refletor (mais próximo do transmissor) e varie lentamente a posição do segundo (mais próximo do receptor). Anote as posições desse segundo refletor em que ocorrem os máximos (ou mínimos) de intensidade, rotulando-os com um índice crescente, até observar em torno de 20 máximos (ou mínimos).
11. Repita as medidas acima pelo menos mais duas vezes, modificando a posição inicial de um dos dois refletores (ou de ambos).

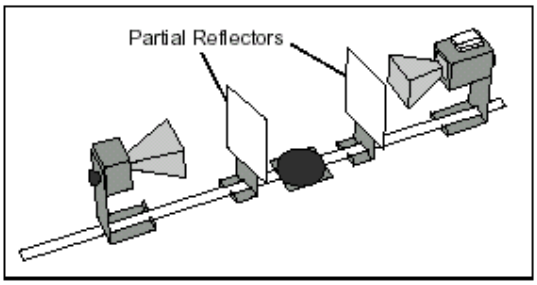


Fig. 2: Arranjo experimental do interferômetro de Fabry-Perot.

AULA 02:

Interferômetro de Michelson:

12. O arranjo experimental encontra-se esquematizado na Fig. 3. **A** e **B** são duas placas totalmente refletoras (metálicas) e **C** é um refletor parcial (não-metálico). As microondas propagam-se até o receptor por dois diferentes caminhos: **T→C→A→C→R**; e **T→C→B→C→R**, sendo **T** o transmissor e **R** o receptor. A interferência entre os dois feixes que chegam ao receptor leva à observação de máximos e mínimos em função das distâncias entre os diversos elementos envolvidos.
13. Conecte o transmissor à fonte de alimentação e ajuste os controles do receptor de modo que um sinal com intensidade razoável seja observável no medidor. Mantenha os dois refletores bastante afastados do refletor parcial central, para evitar efeitos de interferência secundária.
14. Movimente o refletor **A** ao longo do goniômetro e observe os máximos e mínimos de intensidade registrados no medidor.

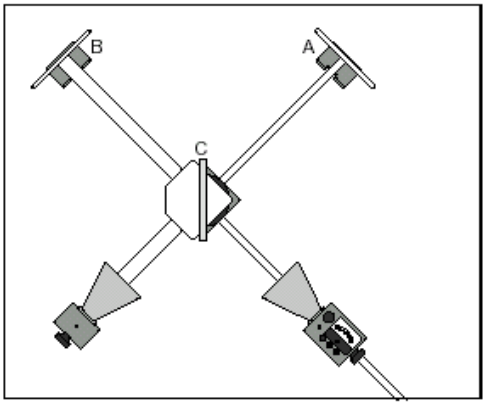


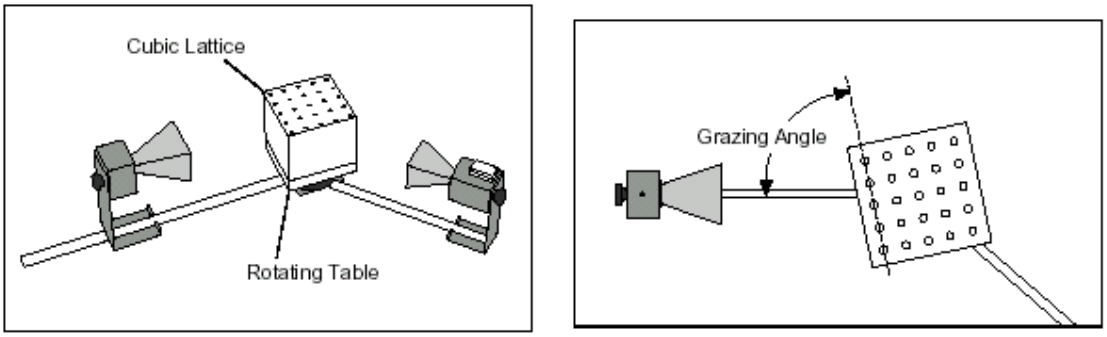
Fig. 3: Arranjo experimental do interferômetro de Michelson.

15. Coloque o refletor **A** em uma posição que produza um máximo de interferência e anote esta posição. Varie agora lentamente a posição de **A**, registrando as posições em que ocorrem os máximos (ou mínimos) de intensidade e rotulando-os com um índice crescente, até observar em torno de 20 máximos (ou mínimos).
16. Repita as medidas acima pelo menos mais duas vezes, modificando a posição inicial de um dos dois refletores (ou de ambos).

Difração de Bragg:

17. O arranjo experimental encontra-se esquematizado na Fig. 4. As microondas incidentes sobre a rede cúbica, formada por esferas metálicas num suporte de plástico, são difratadas nos ângulos definidos pela lei de Bragg. A rotação da rede e/ou do braço do goniômetro (onde está fixo o receptor) permite a observação desses máximos e a medida dos ângulos correspondentes.
18. Posicione o transmissor e o receptor alinhados frontalmente (ângulo nulo na escala do goniômetro). Ajuste a orientação da rede cúbica de modo que os planos (100) (paralelos a uma das faces do cubo formado pelas esferas) estejam *paralelos ao eixo de simetria do transmissor* (observe a Fig. 5 para a identificação de três famílias de planos formados pelas esferas). Conecte o transmissor à fonte de alimentação e ajuste os controles do receptor de modo que um sinal com intensidade razoável seja observável no medidor. Registre a leitura do medidor nessa situação inicial.
19. Gire a rede cúbica de 1º em um dado sentido (horário, por exemplo) e simultaneamente gire o braço do goniômetro de 2º no mesmo sentido. Anote o valor do ângulo θ entre o eixo de simetria do transmissor (direção de incidência) e a direção paralela aos planos de interesse (veja a Fig. 4b).
20. Prossiga dessa forma, sempre girando o braço do goniômetro de 2° para cada 1º de rotação da rede, até atingir o ângulo $\theta = 60º$. Registre a leitura do medidor em cada posição. Se for necessário mudar o ganho do receptor (controle "INTENSITY"), anote as alterações feitas para que depois os valores coletados possam ser normalizados.

21. Repita os procedimentos acima agora utilizando a família de planos (110) (paralelos à diagonal de uma face do cubo formado pelas esferas, como mostrado na Fig. 5).
22. Meça com um paquímetro a distância entre as esferas que formam a rede cúbica.



(a) (b)

Fig. 4: (a) Arranjo experimental para estudo da lei de Bragg. (b) Ilustração da medida do ângulo de incidência.

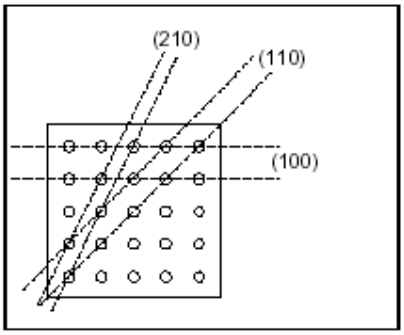


Fig. 5: Ilustração de algumas famílias de planos formados pelas esferas metálicas.

CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. A potência irradiada pelo transmissor de microondas é suficientemente baixa para estar dentro dos níveis padronizados de segurança para o operador. Entretanto não se deve jamais olhar diretamente para a corneta de transmissão quando o transmissor está ligado.
2. Microondas podem causar interferência em dispositivos médicos eletrônicos, como marcapassos. Caso o operador faça uso de qualquer dispositivo desse tipo, deve-se consultar um médico especialista para avaliar a possibilidade de risco causada pela irradiação de baixa potência de microondas de 10,525 GHz.
3. Mantenha sempre todo o aparato experimental limpo e sobre uma superfície firme, limpa e sem rugosidades. Especial cuidado deve ser tomado com partículas metálicas, que atuam como excelentes refletores de microondas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. Os máximos de interferência no interferômetro de Fabry-Perot ocorrem quando a distância entre os refletores parciais é igual a $n\lambda/2$, onde λ é o comprimento de onda da radiação e n é um número inteiro.
2. Os máximos sucessivos de interferência no interferômetro de Michelson são obtidos cada vez que um dos dois refletores (o refletor **A**, por exemplo) é deslocado de uma distância igual a $\lambda/2$.
3. A lei de Bragg é expressa como:

$$2d \operatorname{sen} \theta = n\lambda , \qquad (1)$$

onde d é a distância interplanar, θ é o ângulo de difração de Bragg (ângulo entre o feixe incidente e os planos atômicos cristalinos) e n é um número natural que indica a ordem de difração (n = 1, 2, 3, ...).

QUESTÕES E CONCEITOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENDIDOS

1. Explique o que você entende por coerência de um ou mais feixes de ondas eletromagnéticas e qual a sua importância nos fenômenos de interferência.
2. Verifique a relação entre o comprimento de onda e a freqüência da radiação de microondas empregada nesta prática.
3. Enuncie e discuta a lei de Malus.
4. Faça uma dedução geométrica da lei de Bragg (Eq. 1).
5. Explique, com base em um desenho esquemático, por que o braço do goniômetro deve sempre ser girado de um ângulo igual ao dobro do ângulo segundo o qual a rede cúbica foi girada, no estudo experimental da lei de Bragg.
6. Deduza as condições de máximo no interferômetro de Fabry-Perot, esquematizando as trajetórias e diferenças de caminhos dos feixes que interferem entre si. Qual espaçamento entre os dois refletores parciais deverá causar um mínimo de interferência?
7. Deduza as condições de máximo no interferômetro de Michelson, esquematizando as trajetórias e diferenças de caminhos dos feixes que interferem entre si. Quais são as condições de mínimo de interferência?
8. Discuta algumas aplicações práticas de microondas e explique brevemente como funciona um forno de microondas.

PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

1. Apresente em uma tabela e em um gráfico os resultados de variação da intensidade da radiação detectada em função da distância entre o transmissor e o receptor.

1. Verifique graficamente se a intensidade da radiação detectada veria com o inverso do quadrado da distância entre o transmissor e o receptor. Era de se esperar que fosse essa a forma de variação? Discuta o resultado encontrado.
2. Apresente em uma tabela e em um gráfico os resultados de variação da intensidade da radiação detectada em função do ângulo entre as cornetas de transmissão e recepção.
2. Verifique graficamente se a variação da intensidade da radiação detectada em função do ângulo entre as cornetas de transmissão e recepção obedece à lei de Malus. Discuta o resultado encontrado.
3. Apresente em uma tabela os resultados das medidas efetuadas com o interferômetro de Fabry-Perot, utilizando as várias medidas efetuadas para obter valores médios e incertezas e tomando o cuidado de ajustar para a mesma origem as medidas feitas com diferentes posições iniciais dos refletores.
4. Monte um gráfico da distância entre os dois refletores parciais no interferômetro de Fabry-Perot em função do índice de contagem dos máximos de interferência observados.
5. Obtenha a partir do coeficiente angular desse gráfico o valor do comprimento de onda da radiação de microondas. Compare com o valor esperado.
6. Apresente em uma tabela os resultados das medidas efetuadas com o interferômetro de Michelson, utilizando as várias medidas efetuadas para obter valores médios e incertezas e tomando o cuidado de ajustar para a mesma origem as medidas feitas com diferentes posições iniciais dos refletores.
7. Monte um gráfico da posição do refletor **A** no interferômetro de Michelson em função do índice de contagem dos máximos de interferência observados.
8. Obtenha a partir do coeficiente angular desse gráfico o valor do comprimento de onda da radiação de microondas. Compare com o valor esperado.
9. Faça um gráfico da intensidade registrada em função do ângulo θ na prática envolvendo a lei de Bragg, com a família de planos (100). Utilize primeiro uma escala que permita a observação de todos os valores registrados para θ entre 0 e 60º e, a seguir, refaça o gráfico com θ entre 10 e 60°.
10. Localize nesse segundo gráfico os picos de difração observados e determine as distâncias interplanares a partir da lei de Bragg. Compare com os valores esperados a partir da distância entre as esferas medida em laboratório.
11. Repita os itens 7-8 acima para a família de planos (110).

DISCUSSÕES ADICIONAIS

1. Discuta brevemente como se dão os processos de geração e emissão de microondas. O que são cavidades de ressonância e qual o seu papel nesses processos?
2. Explique quais as vantagens de se utilizarem feixes de microondas ao invés de luz visível para o estudo de fenômenos óticos como interferência, difração e polarização.

3. Tanto os objetos refletores totais quanto as esferas utilizadas na rede cúbica são metálicos. Por outro lado, é comum ouvirmos advertências sobre os riscos de utilização de recipientes metálicos em fornos de microondas. Explique essas observações com base nas propriedades de propagação das ondas eletromagnéticas em meios metálicos. Calcule a profundidade de penetração das microondas utilizadas nessa experiência em alguns metais típicos (cobre, latão, alumínio, etc).
4. Os interferômetros foram usados nesta prática para obtenção do comprimento de onda da radiação de microondas, uma vez medidas as distâncias entre os refletores envolvidos. Uma aplicação no sentido inverso dos interferômetros consiste na obtenção com precisão de distâncias a partir de radiações com comprimentos de onda conhecidos. Estime a distância mínima que um interferômetro é capaz de fornecer com precisão. Faça estimativas numéricas para interferômetros de microondas e interferômetros óticos (operando com luz visível).
5. A rede cúbica utilizada na experiência envolvendo a lei de Bragg possuía esferas separadas por distâncias da ordem de cm. Em um cristal real, os átomos encontram-se separados por distâncias da ordem de Å. Qual a ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação que deve ser utilizada para investigar a estrutura de cristais por meio de difração? Justifique!! Qual a denominação dessa radiação no espectro eletromagnético?
6. Discuta algumas aplicações práticas dos interferômetros de Michelson e de Fabry-Perot.

BIBLIOGRAFIA

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentos de Física, Vol. 4, LTC, 4ª ed., Rio de Janeiro, 1993.
2. J. Smit, Microondas, Livros Érica Editora Ltda , São Paulo, 1987.
3. J. R. Reitz, F. J. Milford, R. W. Christy, Fundamentos da Teoria Eletromagnética, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1982.
4. A. C. Melisinos, Experiments in Modern Physics, Academic Press, New York, 1966.
5. F. A. Jenkins, H. White, Fundamentals of Optics, McGraw Hll, 1976.
6. J. R. Meyer-Arendt, Introduction to Classical and Modern Optics, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
7. Microwave Optics, Manual de instruções – PASCO Scientific, 1991.
8. M. Ference Jr., H. B. Lemon, R. J. Stephenson, Curso de Física – Eletrônica e Física Moderna, Edgrad Blücher Ltda.

Redação: Prof. Jair C. C. Freitas

Grupo ___: _____; _____;_____ *Data: _____*

FOLHA DE DADOS

AULA 01:

Medidas iniciais

Distancia entre as cornetas (cm)	Intensidade (u. a.)

Ângulo entre as cornetas (°)	Intensidade (u. a.)

Ângulo entre as cornetas (°)	Intensidade (u. a.)

Ângulo entre as cornetas (°)	Intensidade (u. a.)

Interferômetro de Fabry-Perot

Posições do refletor móvel correspondentes aos _____ (___):

1ª série	2ª série	3ª série	4ª série	5ª série

Posições do refletor fixo: _____ _____ _____ _____ _____ (___)

Grupo ___: _____; _____;_____ *Data: _____*

AULA 02:

Interferômetro de Michelson

Posições do refletor móvel correspondentes aos _____ (___):

1ª série	2ª série	3ª série	4ª série	5ª série

Difração de Bragg

Planos (100)

θ (°)	Int. (u. a.)	θ (°)	Int. (u. a.)	θ (°)	Int. (u. a.)

Planos (110)

θ (°)	Int. (u. a.)	θ (°)	Int. (u. a.)	θ (°)	Int. (u. a.)